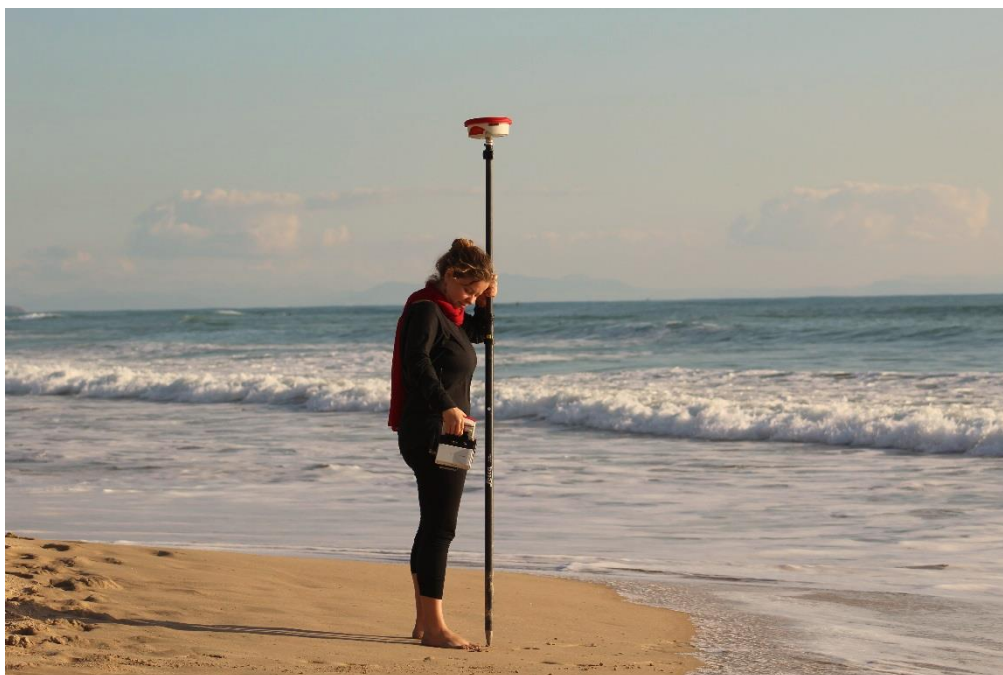


## Trabajo de Fin de Grado

Manuel Pecino Barrios

### Caracterización morfológica y respuesta ante los temporales en la playa de El Carmen (Barbate, Cádiz)



Tutora: Laura del Río Rodríguez

Puerto Real, Febrero de 2017

## **Agradecimientos**

En primer lugar, debo agradecerle a la profesora Dra. Laura del Río del departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Cádiz por dirigir este trabajo, por su generosa ayuda y por su inmensa paciencia conmigo durante el periodo de más de un año que me ha llevado la realización de este proyecto.

A mi compañera Ana Beatriz Moreira Martinelli, la chica de la portada, con la que compartimos largos pero divertidos viajes en coche para llegar hasta Barbate, pasándolas “putas” para montar y configurar el equipo GPS, pasando mucho frío y calándonos hasta los huesos, pero sobre todo gracias por haberme ayudado tanto a la realización del trabajo y por no haberme negado nunca tu sonrisa.

Gracias a todos los compañeros que en algún momento han pasado por mi vida, en especial a aquellos que han permanecido hasta el final, Manuel Varela, Julio, Lolo, Carlos, Pepe, Pablo, Coral, Estela, María, Almu, Lola... y sobre todo Cristóbal, que siempre ha estado a mi lado y al que le debo innumerables buenos momentos.

A mi familia y amigos, a mi madre, a ella se lo debo todo, por haber luchado tanto para darme la oportunidad de seguir estudiando y haberme animado siempre a mirar hacia delante, me has enseñado a ser como soy, y por ello no hay persona a la que agradecerle tanto como a ti. Mónica Serrano Abril, a quien conocí por casualidad y se ha convertido en la persona más especial en mi vida. Pepi y Paco también tienen un hueco en estos agradecimientos, por no haber dudado de mí y por aceptarme como soy.

Y por último y no por ello menos importante, mi perrita Talia, que aunque sea un animal, para mí es mucho más que una mascota, que puede estar horas a mi lado mientras trabajo y que puede darte la mejor de las compañías cuando uno se siente solo, mi mejor amiga que me seguirá allá donde vaya.

Gracias a todos.

# Índice

RESUMEN

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Hipótesis de partida y objetivos .....	2
2. ANTECEDENTES.....	3
3. ZONA DE ESTUDIO .....	4
3.1. Localización general .....	4
3.2. Contexto geológico – geomorfológico.....	5
3.3. Marco climático e hidrodinámico .....	6
4. METODOLOGÍA .....	9
4.1. Caracterización morfológica .....	9
4.2. Caracterización sedimentológica .....	11
4.3. Caracterización morfodinámica .....	12
4.4. Impacto de temporales .....	14
5.RESULTADOS .....	14
5.1. Registro de temporales.....	14
5.2. Morfología.....	15
5.3. Granulometría .....	20
5.4. Caracterización morfodinámica .....	21
6. DISCUSIÓN.....	23
6.1. Cambios morfológicos a corto plazo .....	23
6.2. Caracterización granulométrica.....	25
6.3. Caracterización morfodinámica.....	25
7.CONCLUSIONES.....	27
8.BIBLIOGRAFÍA.....	28

## RESUMEN

Los temporales marítimos suponen la principal causa de alteración natural en las playas en muchos ambientes costeros, causando grandes impactos en las zonas litorales, especialmente en las playas de arena. En zonas urbanas, los efectos pueden intensificarse y a veces se acompañan de daños socioeconómicos y pérdidas económicas significativas debido a la erosión costera y a las inundaciones. En este trabajo se presentan los resultados de un seguimiento de la playa de El Carmen (Barbate) que ha permitido caracterizar, por un lado, el comportamiento morfológico y morfodinámico de la playa, a partir de su granulometría, pendiente y diversos parámetros morfodinámicos y, por otro, analizar su respuesta ante los temporales a lo largo de un invierno de seguimiento topográfico. Se observó que existen cambios a corto plazo, generalmente con una tendencia erosiva en la zona de *backshore* y acreción en la zona de *foreshore*, típico de playas estacionales y que dichos cambios se acentúan tras la presencia de un temporal. Los resultados obtenidos serán de gran utilidad para la correcta gestión del litoral, ya que facilitan una información esencial de cara a diseñar obras de regeneración perdurables.

**Palabras clave:** morfodinámica de playas, temporales, playa de El Carmen, erosión.

## ABSTRACT

Maritime storms are the main cause of natural disturbance on beaches in many coastal environments, causing great impacts over the coastal zone, especially on sandy beaches. In urbanized zones, storm effects are intensified and often accompanied by socioeconomic damage and economic losses due to coastal erosion and flooding. This work presents the results of a monitoring of El Carmen beach (Barbate). By this way, morphological and morphodynamic behavior of the beach, and the response of the beach to the storms during the studied winter were obtained. Short-term beach changes were observed, generally with an erosive trend in the *backshore* zone and accretion in the *foreshore* zone, typical of seasonally beaches, also observed that changes are accentuated by the presence of a storm. The results obtained will be very useful for the correct management of the littoral, as they provide essential information in order to design beach nourishments works.

**Key words:** Beach morfodynamics, storm, El Carmen beach, erosion.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las zonas litorales albergan la mayor parte de la población de los estados costeros, por lo que son de vital importancia. Las áreas adyacentes a las costas mundiales están asociadas con cada vez más crecientes concentraciones de poblaciones humanas, incluyendo muchas de las ciudades más grandes del mundo. Se estima que alrededor del 60% de la población mundial vive a menos de 100 km de la costa (Small y Nicholls, 2003) y las previsiones de futuro manifiestan una intensificación en el crecimiento de dicha población (Benavente *et al.*, 2009). En el caso de España, su costa presenta un total de 6.637 km, donde más del 40% se encuentra ya urbanizada o tiene calificación de urbanizable (Sanz, 2000), lo que supone una elevada cifra de población y el asentamiento de diversas actividades socioeconómicas ligadas a la costa que con frecuencia causan un impacto negativo en el entorno natural.

Las playas son acumulaciones de materiales no consolidados en zonas litorales y están sujetas a la acción del oleaje, las corrientes, los vientos y las mareas, razón por la que constituyen el medio sedimentario costero más dinámico (Benavente *et al.*, 2015). En muchos ambientes costeros, los temporales suponen la principal causa de alteración natural en las playas (Benavente *et al.*, 2002), implicando procesos erosivos y sedimentarios como respuesta a los cambios en el régimen de oleaje incidente (Anfuso *et al.*, 1998). En este sentido, los procesos de erosión costera, entendiendo como tal la modificación (retroceso) de la línea de costa preexistente con la consiguiente pérdida de sedimento, se pueden producir de forma natural (temporales de alta energía, subida del nivel del mar...) o pueden ser inducidos antrópicamente (construcción de embalses en cuencas fluviales, desmantelamiento de cordones dunares, obras portuarias...), presentando una serie de características que permiten catalogarlos como riesgos naturales (Zújar, 2000; Gracia *et al.*, 2002). Es importante señalar que a diferencia de los eventos de erosión a largo plazo (debidos al balance sedimentario negativo en la franja litoral), los procesos erosivos ligados a fenómenos extremos de baja frecuencia y alta intensidad (temporales) pueden conllevar la erosión de importantes sectores de playa, pero los sedimentos erosionados, al menos en parte, retornan al sistema sedimentario litoral cuando finaliza el evento y cambian las condiciones hidrodinámicas que lo controlan (Zújar, 2000).

En este contexto, la necesidad de proteger estructuras humanas de la erosión costera y el crecimiento de la demanda de usos recreativos en las playas han incrementado el interés en el estudio de los procesos morfodinámicos costeros (Anfuso et al., 2008), pues existe una clara interrelación entre morfología (perfil de la playa, forma en planta), granulometría del sedimento y dinámica marina (energía del oleaje, rango de mareas) (Komar, 1998). El conocimiento de estas relaciones permite predecir el comportamiento de la playa, explicar sus ritmos de cambio y establecer tendencias en el caso de que alguna de las variables que la condicionan cambie por causas naturales o antrópicas (Benavente et al., 2015).

En las últimas décadas la administración española ha llevado a cabo numerosas intervenciones con el objetivo de paliar en lo posible los impactos de la erosión costera; generalmente, las actuaciones han consistido en la regeneración artificial de playas y dunas, a veces acompañadas de la construcción de estructuras rígidas (Gracia et al., 2002). Sin embargo, la regeneración de playas no suele constituir una solución definitiva, ya que diversos factores como el diseño del perfil artificial de la playa, la granulometría del sedimento o las condiciones de contorno pueden provocar la pérdida del sedimento aportado (Anfuso et al., 2001).

Por tanto, el conocimiento detallado del comportamiento natural de las playas y de los factores que influyen en su dinámica resulta fundamental de cara a diseñar obras de regeneración perdurables (Anfuso et al., 2001). Estos aspectos son de especial relevancia en playas urbanas con una elevada afluencia de público, como es el caso de la playa de El Carmen (Barbate).

### **1.1. Hipótesis de partida y objetivos**

Se considera como hipótesis de partida que la costa de Barbate presenta altos niveles de vulnerabilidad física ante temporales marítimos, con tendencia erosiva, pudiendo ocasionar un riesgo para las infraestructuras y actividades humanas, y generando pérdidas significativas de tipo medioambiental, económico y social.

Partiendo de dicha hipótesis, este trabajo de investigación plantea dos objetivos principales:

A) Por un lado, caracterizar desde el punto de vista morfológico y morfodinámico la playa de El Carmen (Barbate), a partir de su granulometría, pendiente y diversos parámetros morfodinámicos.

B) Por otro lado, analizar la respuesta de la playa ante los temporales a lo largo de un invierno de seguimiento topográfico.

Los resultados obtenidos proporcionarán una idea de los impactos de los eventos de temporal en la playa de El Carmen, como información esencial para contribuir a una mejor gestión y planificación del entorno litoral de la zona.

## **2. ANTECEDENTES**

Los primeros estudios sobre temporales marítimos y sus efectos sobre la costa fueron principalmente de carácter descriptivo, centrados en su mayoría en los impactos de los huracanes sobre la costa norteamericana del Golfo de México (Dolan y Godfrey, 1973). A partir de la década de los '80 se desarrollaron líneas de investigación más específicas, encaminadas a la predicción cuantitativa de los cambios morfológicos costeros asociados a temporales, especialmente sobre playas y dunas (Balsillie, 1986). En las tres últimas décadas, gracias al desarrollo tecnológico, se han comenzado a analizar de forma pormenorizada las variables físicas que intervienen en los efectos asociados a los temporales y su papel en la modificación de las formas costeras (Stone y Finkl, 1995).

En cuanto a las investigaciones sobre variaciones costeras, además de los estudios *in situ* (generalmente mediante instrumentación topográfica, como estación total y GPS diferencial), cabe destacar el uso de fotografías aéreas para el estudio de los cambios costeros a medio plazo. A partir de los años 90, cobran importancia los sensores a bordo de satélites artificiales, de características y aplicaciones muy variadas en dinámica litoral. Por último, destaca también el uso de sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging*) aerotransportados, que permiten realizar levantamientos topográficos de detalle sobre amplias zonas.

En lo que respecta a la costa del Golfo de Cádiz, gracias al trabajo de los grupos de investigación de universidades como la de Cádiz, Huelva o Pablo de Olavide (Sevilla), el conocimiento sobre la actuación de temporales marítimos en las costas de la provincia y

sus efectos, así como las características geomorfológicas y dinámicas del litoral, ha avanzado mucho en las dos últimas décadas.

En concreto, sobre el estudio de los temporales y su impacto, se han desarrollado modelos de sobreelevación del nivel del mar asociados a fenómenos de *storm surge* (Benavente *et al.*, 2006), estudios de los efectos de los temporales en las playas (Benavente *et al.*, 2002, 2015), análisis de los umbrales de tormenta necesarios para producir daños costeros (Ribera *et al.*, 2011; Del Río *et al.*, 2012) o determinación de la influencia de patrones atmosféricos de gran escala en el impacto de temporales (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2013; Plomaritis *et al.*, 2015; Anfuso *et al.*, 2016).

Por otro lado, las características geomorfológicas y la dinámica costera del litoral gaditano han sido abordadas en distintos estudios que comprenden desde el estado morfodinámico de las playas (Benavente *et al.*, 2000; Anfuso y Benavente, 2006, entre otros), la cuantificación de las variaciones recientes del litoral (Anfuso y Del Río, 2003; Del Río *et al.*, 2013) o la vulnerabilidad de los acantilados ante la erosión (Del Río y Gracia, 2009), hasta aspectos más cualitativos como la percepción que tiene la población de los riesgos litorales (Boyer-Villemaire *et al.*, 2014).

### 3. ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1. Localización general

La playa de Nuestra Señora del Carmen se sitúa en la localidad de Barbate (Cádiz, SO de España) en torno a los 36°11' de latitud Norte y los 5°54' de longitud Oeste, en la costa Atlántica de la provincia (Figura 1).



**Figura 1.** Localización de la Playa del Carmen (Fuente: Modificado de Ortofotografía de IECA 2010)

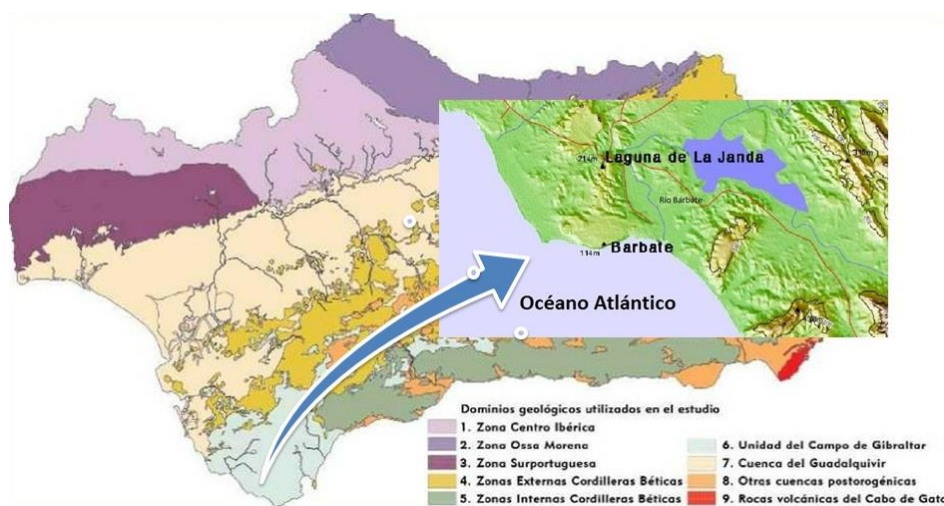


La playa no está incluida dentro del cercano Parque Natural de la Breña y Marismas del Barbate, por estar urbanizada en su mayor parte y respaldada por el paseo marítimo de la localidad de Barbate.

### 3.2. Contexto geológico-geomorfológico

En la costa de la provincia de Cádiz se pueden distinguir dos zonas desde el punto de vista geológico (Gutiérrez Mas *et al.*, 1991): la parte norte, perteneciente a la cuenca del Guadalquivir, y la parte sur, que corresponde al Complejo del Campo de Gibraltar, en las estribaciones de las Cordilleras Béticas (Figura 2).

La zona de estudio se encuentra situada en la comarca de la Janda, en el Complejo del Campo de Gibraltar, formado principalmente por rocas de naturaleza arcillo-margosas y por alternancias entre areniscas y arcillas tipo flysch (Diputación de Cádiz, 2016). La desembocadura del río Barbate ocupa una fosa tectónica costera de dirección N-S (Luque *et al.*, 1999). En dicha desembocadura se formó una flecha litoral debido al depósito de sedimento tanto fluvial como marino, propiciada por la estabilización del nivel del mar tras la transgresión Flandriense (Ménanteau *et al.*, 1983; Gracia y Benavente, 2000), iniciándose hace aproximadamente 4200 años (Zazo *et al.*, 1994; Lario, 1996; Borja *et al.*, 1999).



**Figura 2.** Dominios geológicos de Andalucía (Fuente: Red de Información Ambiental, Consejería de Medio Ambiente, 2006)

En la actualidad la flecha presenta dirección O-E (Figura 3), con una anchura media aproximada de 145 metros, y en su extremo existen algunas dunas embrionarias en mal estado de conservación.



**Figura 3.** Desembocadura del río Barbate, flecha litoral, playa de Nuestra Señora del Carmen y marismas del Barbate (Fuente: Ministerio de Medio Ambiente).

### 3.3. Marco climático e hidrodinámico

El clima de Barbate y de toda la zona litoral de la comarca de la Janda se corresponde con clima Mediterráneo, aunque modificado por la influencia atlántica; destacan la intensidad y frecuencia de los vientos generados en la zona por la confluencia de masas de aire marítimo y continentales, por lo que algunos autores definen este clima como Mediterráneo Oceánico (Capel Molina, 1981). La clasificación de Köppen-Geiger sitúa esta zona como clima templado con verano seco y caluroso.

Las temperaturas presentan un marcado contraste entre la estación fría y húmeda (invierno) y la seca y cálida (verano), pero mantienen registros moderados durante todo el año, con una media de 17° (Tabla 1). El régimen de precipitaciones anuales es moderado, oscilando por lo general entre 500 y 700 mm, teniendo como máximo pluviométrico el final de la temporada otoño-invierno (noviembre-diciembre) y un máximo secundario en primavera, con fuerte escasez de lluvias en la estación estival (Capel Molina, 1981).

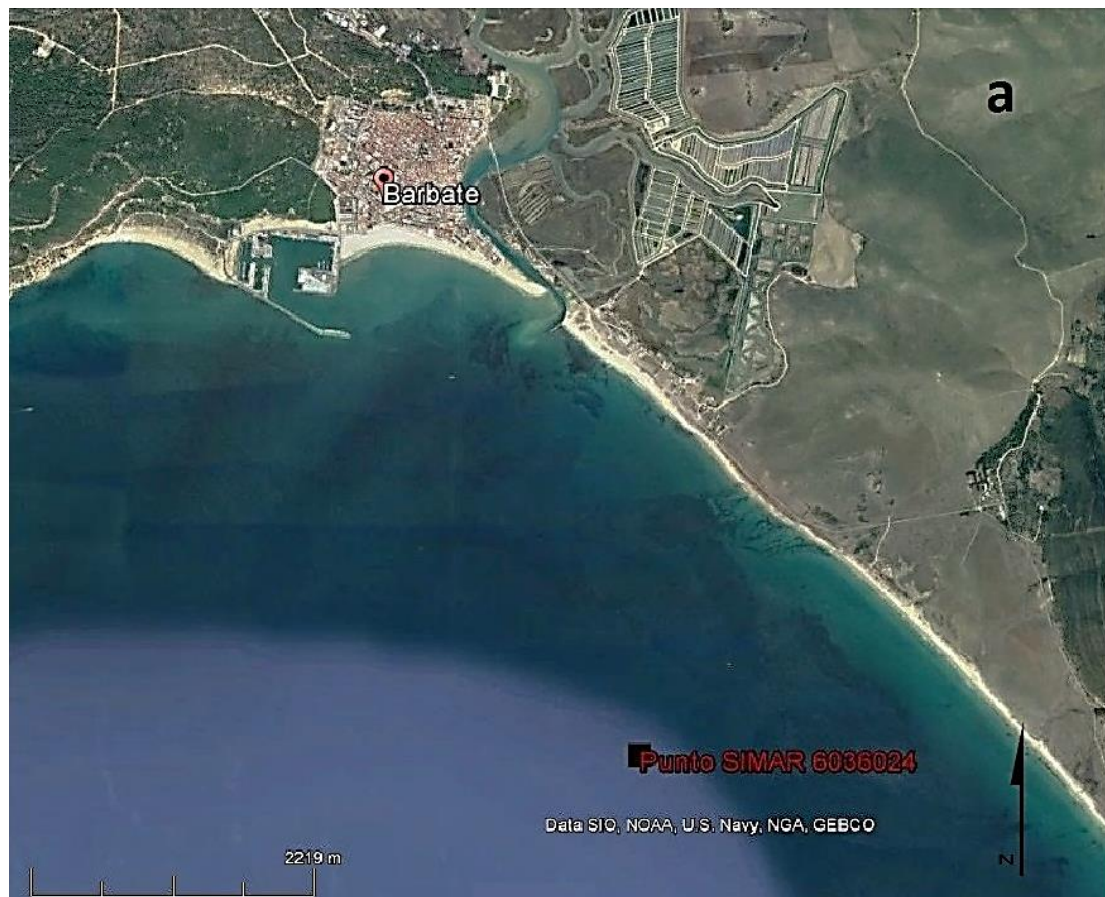
Los vientos predominantes en la zona (Figura 4) son el Levante y el Poniente, procedentes del SE y O respectivamente. El Levante sopla procedente del Mar Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar, siendo muy relevante para el transporte eólico; no obstante, no juega un papel importante en la generación de oleaje debido a su pequeño *fetch*. Sin embargo, el Poniente, viento más húmedo que el anterior y procedente del Atlántico, posee un *fetch* elevado y genera oleaje a menudo asociado a eventos extremos, como los temporales (Gracia y Benavente, 2000).

**Tabla 1:** Valores climatológicos normales para Tarifa durante el periodo 1981- 2010, siendo T la temperatura media mensual, P las precipitaciones mensuales medias y H la humedad relativa media. (Datos tomados de AEMET, 2016).

Mes	T (°C)	P (mm)	H (%)
Enero	13.0	70	77
Febrero	13.0	75	79
Marzo	14.4	48	78
Abril	15.2	57	77
Mayo	17.2	28	78
Junio	19.8	8	79
Julio	21.7	2	80
Agosto	22.3	4	81
Septiembre	21.1	16	81
Octubre	18.6	80	81
Noviembre	15.9	86	79
Diciembre	14.1	118	78

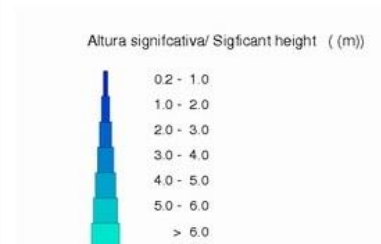
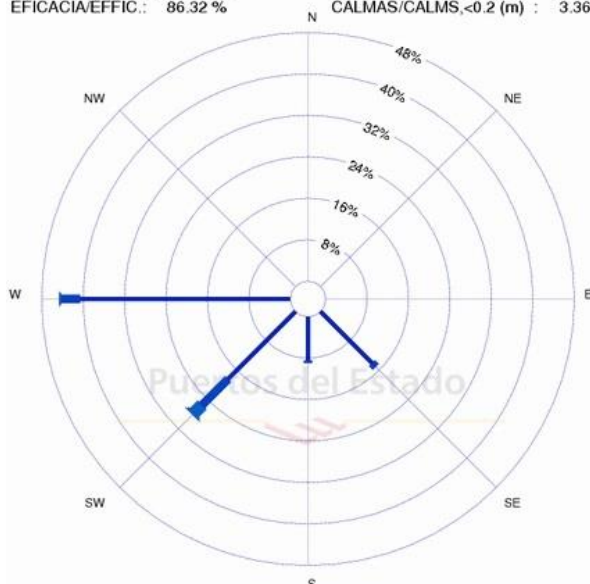
En este sentido, en el oleaje predomina el *swell* o mar de fondo frente al *sea* o mar de viento (Gracia et al., 2002), con olas que en pocas ocasiones superan el metro de altura, por lo que, según la definición de Tanner (1960) y Hegge et al. (1996), la costa en este tramo se puede clasificar como de baja energía. Según Puertos del Estado, en esta zona se consideran olas de temporal a aquéllas superiores a 1,5 m (Benavente et al., 2000). Sin embargo, durante episodios de temporal, la altura puede llegar a los 4 m e incluso superar los 7 m durante temporales extremos, con periodos comprendidos entre 8-11 seg y 12-15 seg respectivamente (Ribera et al., 2011). La dirección de la deriva litoral en toda la costa gaditana es ONO-ESE, asociada a la orientación de la costa y al predominio del oleaje de Poniente (Anfuso et al., 2002).

En lo que respecta a la marea, su amplitud presenta una disminución continuada desde la zona central de la provincia de Cádiz hacia el Estrecho de Gibraltar. El rango mareal medio en mareas vivas en Barbate es de 2,3 m (Del Río, 2007).



LUGAR/LOCATION: SIMAR 6036024  
 PERIODO/PERIOD: 2005-2016  
 EFICACIA/EFFIC.: 86.32 %

MUESTREO/SAMPLING: 1Hor.  
 INTERVALO/INTERVAL: Global  
 CALMAS/CALMS,<0.2 (m) : 3.36 %



**Figura 4:** (a) Localización del punto SIMAR 6036024, situado frente a la costa de Barbate, con coordenadas decimales 5.90°O 36.15°N (Google Earth, 2015). (b) Dirección y altura significativa del oleaje entre los años 2005 y 2016, simulación en punto SIMAR 6036024 (Puertos del Estado, 2016).

## **4. METODOLOGÍA**

Para cumplir los objetivos planteados se aplicarán diversas metodologías. Por un lado, se analizarán una serie de perfiles topográficos medidos quincenalmente en la playa de El Carmen de Barbate a lo largo del invierno 2015-2016, y se realizarán comparaciones con datos de oleaje para identificar la relación existente entre los cambios del perfil de la playa y los temporales registrados. Por otro lado, se analizarán distintas muestras de sedimento recogidas durante una de las campañas con el fin de realizar una caracterización sedimentológica de la playa. Asimismo, a partir de la caracterización morfológica y sedimentológica y del análisis de los datos de oleaje, se efectuará la caracterización del estado morfodinámico de la playa.

### **4.1. Caracterización morfológica**

El procedimiento clásico para el estudio de la morfología costera ha sido tradicionalmente la realización de levantamientos topográficos con teodolitos o estación total; sin embargo su utilidad, debido al coste en tiempo y en dinero, queda restringida a estudios de zonas muy localizadas (Zújar, 2000). La ventaja principal del GPS diferencial con respecto a la utilización de la estación total es que con esta última sólo es posible obtener medidas de altura y distancia transversal y los cambios laterales no son tenidos en cuenta, asumiendo que el perfil escogido es representativo de la zona estudiada (Wright y Short, 1984; Masselink y Short, 1993).

Por tanto, para la toma de los datos de topografía se ha utilizado un equipo RTK-DGPS de la marca Leica (Figura 5), con el que se realizó la técnica de levantamiento topográfico mediante perfiles perpendiculares a la línea de orilla y perfiles paralelos a dicha línea con el fin de crear una malla de puntos. Este método resulta muy práctico y a la vez rápido para llevar a cabo el seguimiento de la morfología de la playa. La técnica diferencial se basa en que un mínimo de dos receptores GPS deben ser siempre utilizados de forma simultánea. Un receptor GPS fijo en tierra (referencia), que conoce exactamente su posición basándose en otras técnicas, recibe la posición dada por el sistema GPS, y puede calcular la diferencia comparando la posición obtenida con la suya, conocida de antemano. La corrección es recibida por el receptor GPS vía radio o vía satélite y se aplica a la posición que se está calculando (ESRI, 2016). Como resultado, la posición mostrada y registrada en el archivo de datos del receptor GPS es una posición diferencialmente corregida en tiempo real (Dail *et al.*, 2000).





**Figura 5:** (a) Receptor base del equipo RTK-DGPS Leica. (b) Antena móvil, que puede ser transportada en una mochila.

El seguimiento topográfico se realizó en un total de 8 campañas, tomando los datos con periodicidad quincenal desde el 1 de octubre de 2015 hasta el 27 de enero de 2016 (Tabla 2). En cada campaña se analizaron dos zonas con características distintas en la misma playa (Figura 6): por un lado, la parte urbana de la playa, limitada por el paseo marítimo y abrigada por la construcción del puerto de Barbate; por otro lado, el sector más alejado del núcleo urbano, caracterizado por la presencia de dunas y la desembocadura del río Barbate, zona a la que se denominará en lo sucesivo “zona natural”. En cada sector se levantaron cuatro perfiles perpendiculares y varios paralelos a la línea de orilla con el objetivo de crear una malla de puntos para poder realizar una interpolación fiable de los datos y así crear un modelo digital del terreno (MDT). Las campañas se realizaron durante las bajamareas vivas, con el fin de cubrir la máxima extensión de playa en cada caso. Las longitudes de los perfiles varían entre 120 y 170 metros; cada perfil está separado del perfil adyacente entre 30 y 50 metros en la zona urbana y alrededor de 50 metros en la zona natural.

Si bien en la zona urbana los transeptos se realizaron desde puntos fijos del paseo marítimo, en la zona natural no se disponía de puntos de referencia para hacer coincidir de manera precisa las cabeceras de los perfiles en las diferentes campañas. Por este motivo, en cada campaña de la zona natural se recogieron datos de perfiles en trazadas ligeramente diferentes. Finalmente se decidió utilizar una zona común en la que se disponía de datos de todas las campañas.

**Tabla 2:** Fechas de realización de campañas de seguimiento topográfico en la playa de El Carmen.

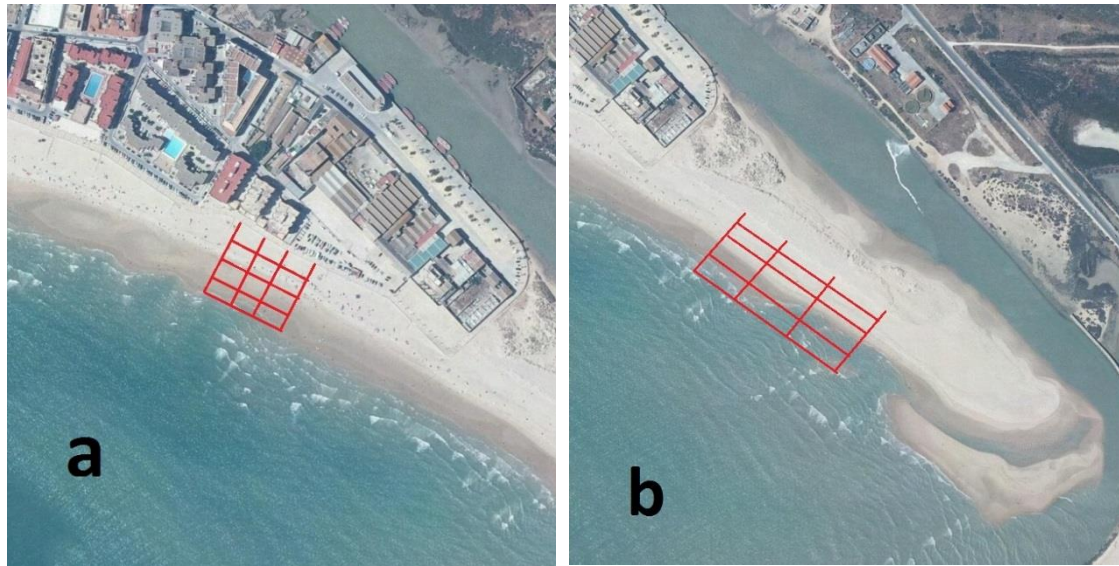
Nº Campaña	Fecha campaña
1	1 Octubre 2015
2	16 Octubre 2015
3	29 Octubre 2015
4	12 Noviembre 2015
5	26 Noviembre 2015
6	11 Diciembre 2015
7	14 Enero 2016
8	27 Enero 2016

Los datos de las diferentes campañas fueron descargados mediante el software Leica Geo Office y procesados con el software ArcGIS 10.0, con el objeto de referir todas las cotas al cero hidrográfico de la zona para así poder comparar las diversas campañas, realizar los modelos digitales del terreno (MDT's) correspondientes y obtener las pendientes de la zona intermareal.

#### **4.2. Caracterización sedimentológica**

Para la caracterización sedimentológica de la playa, se recogieron una serie de muestras en cada una de las zonas descritas y para cada uno de los perfiles el día 26 de noviembre de 2015, durante la campaña número 5. En total se analizaron doce muestras de cada sector, tres para cada perfil perpendicular a la línea de orilla (Figura 6) y que corresponden respectivamente a la zona de playa seca, el intermareal alto y el intermareal bajo.

La granulometría de las muestras de sedimento se analizó mediante una tamizadora vibratoria, que permite separar los distintos tamaños de grano. Se empleó una columna de ocho tamices, cada uno con un tamaño específico de luz de malla, en los que van quedando retenidos los granos de arena mientras van cayendo por gravedad y con la ayuda de la vibración de la máquina; posteriormente se realiza una clasificación y pesado de lo recogido en cada tamiz. Finalmente, los datos se vuelcan en el programa Gradistat, con el que pueden obtenerse las estadísticas del tamaño de grano usando el método de Folk y Ward (1957). Los tamaños de luz de malla empleados fueron 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 y 0.063  $\mu\text{m}$ , siguiendo la metodología de Benavente (2000).



**Figura 6:** Perfiles perpendiculares y paralelos a la línea de orilla con los que se crea la malla de puntos para las zonas Urbana (a) y Natural (b).

### 4.3. Caracterización morfodinámica

Es importante conocer el comportamiento morfodinámico de las playas de cara a comprender su respuesta ante la actuación del oleaje. Así, la caracterización morfodinámica resulta útil para contribuir a una correcta gestión del litoral, a la prevención de la erosión costera y el diseño de obras de regeneración de playas (Anfuso y Benavente, 2006).

Para el cálculo de índices morfodinámicos es necesario emplear datos de oleaje. En este trabajo se han utilizado datos cedidos por Puertos del Estado, en concreto datos obtenidos a partir de modelado numérico, pues no existe ninguna boya de oleaje lo suficientemente cerca de la zona de estudio para proporcionar información fiable. Los datos empleados corresponden a las series SIMAR, que surgen de la concatenación de dos conjuntos de datos: SIMAR-44 y WANA, ofreciendo datos desde 1958 a la actualidad (Puertos del Estado, 2016). Se utilizó el periodo de datos SIMAR comprendido entre octubre de 2015 y febrero de 2016, correspondiente al intervalo de seguimiento topográfico de la playa.

Se calcularon dos índices morfodinámicos clásicos: el Parámetro de Similitud de Surf (Battjes, 1974) y el parámetro adimensional de caída de grano (Gourlay, 1968), conocido como “Número de Dean”. El primer índice viene expresado como:

$$\xi = \tan\beta / (H_b / L_0)^{0.5} \quad (I)$$



donde  $\tan\beta$  es la pendiente de la zona intermareal,  $H_b$ , la altura de ola en rompiente, y  $L_0$ , la longitud de onda del oleaje en aguas profundas. Este índice fue definido por Iribarren y Nogales (1949) y se emplea para predecir el tipo de rompiente, si bien según Fredsoe y Deigaard (1992), también está relacionado con el estado morfodinámico de las playas. Así, roturas tipo ondulada – colapsada ( $\xi > 2$ ), son típicas de playas reflectivas, mientras que roturas en voluta ( $0,4 < \xi < 2$ ) caracterizan playas intermedias y roturas en derrame ( $\xi < 0,4$ ) serán propias de playas disipativas (Anfuso *et al.*, 2002).

El número de Dean, propuesto por Gourlay (1968) y Dean (1973), se expresa como:

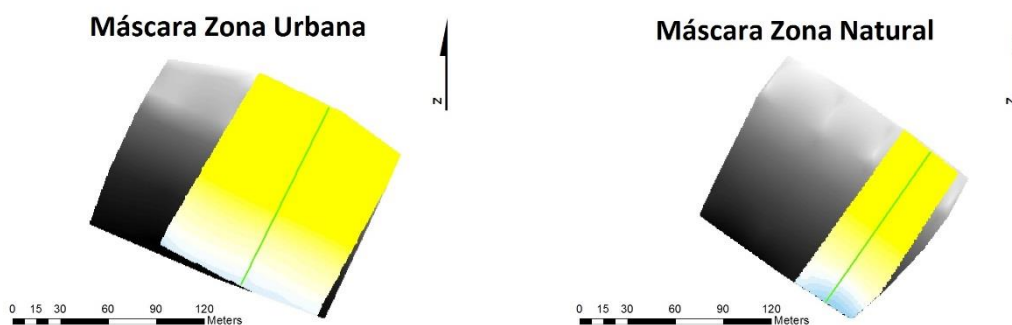
$$\Omega = H_b/W_s T \quad (II)$$

donde  $T$  representa el periodo del oleaje y  $W_s$  la velocidad de caída del sedimento expresada a su vez como  $W_s=273D_{50}$ , donde  $D_{50}$  corresponde al tamaño medio de grano. Dado que el número de Dean incorpora características del oleaje y del sedimento, este parámetro se utiliza para caracterizar el estado morfodinámico de las playas, diferenciando entre playas reflectivas ( $\Omega < 1$ ), intermedias ( $1 < \Omega < 6$ ) y disipativas ( $\Omega > 6$ ) (Wright *et al.*, 1985).

Para el cálculo de  $H_b$  se promediaron los valores de  $H_{m0}$  (altura significante espectral) correspondientes al mes anterior a la recogida de muestras, siguiendo la idea propuesta de Benavente (2000), y se utilizó la expresión de Komar y Gaughan (1972) para la transformación de la altura del oleaje de aguas profundas a rompiente:

$$H_b=0,39g^{0,2}(TH_0^2)^{0,4} \quad (III)$$

Por otra parte, dados los cambios granulométricos que se producen a lo largo del perfil de playa, y siguiendo la idea propuesta por Medina *et al.* (1995), se tomó un tamaño de grano medio para cada transepto y se obtuvo el  $D_{50}$  (mediana de la distribución granulométrica) tanto para la zona urbana como para la natural. Asimismo, se debe aclarar que para el cálculo de los parámetros antes descritos sólo se han tomado en cuenta las zonas de la playa escogidas donde se contaba con datos de todas las campañas (Figura 7).



**Figura 7:** En gris degradado la zona completa a la que se le aplicó una máscara de recorte. En colores el resultado del recorte con máscara. La línea verde representa el perfil escogido para el cálculo de la pendiente en el intermareal.

#### 4.4. Impacto de temporales

Utilizando el conjunto de datos sintéticos SIMAR, se identificaron los eventos de temporal, considerando como tales aquellos eventos con alturas de ola de 1,5 metros o superiores, umbral propuesto por Puertos del Estado. Si bien en teoría la duración mínima para considerar un temporal en la zona de estudio debe ser de 12 horas (Del Río et al., 2012), se consideraron todos los existentes, aun de menor duración, debido a la escasa energía del invierno de seguimiento.

Una vez extraídos los datos de temporales, se compararon con la evolución de las distintas zonas de la playa a lo largo del invierno.

### 5. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras el procesado de los datos, dándoles salida gráfica para una mejor interpretación, con el objetivo de cuantificar los cambios que hayan tenido lugar en el sistema.

#### 5.1. Registro de temporales

En la Tabla 3 se detallan los eventos de temporal registrados durante el periodo de estudio, sus características y las fechas de las campañas realizadas. Se observan 3 eventos de temporal durante el periodo analizado, que pueden ser correspondidos con 2 de las campañas realizadas (campañas 4 y 7), ya que ambas tuvieron lugar poco tiempo después de dichos temporales. La altura de las olas en todos los casos es relativamente baja, entre

1,5 y 2,2 m, apenas superando el límite inferior para considerarlas olas de temporal. La dirección de procedencia, tanto del viento como del oleaje, es SO-OSO en todos los casos.

**Tabla 3:** Fechas de los eventos de temporal registrados y las campañas realizadas, en rojo las campañas cercanas a eventos de temporal.

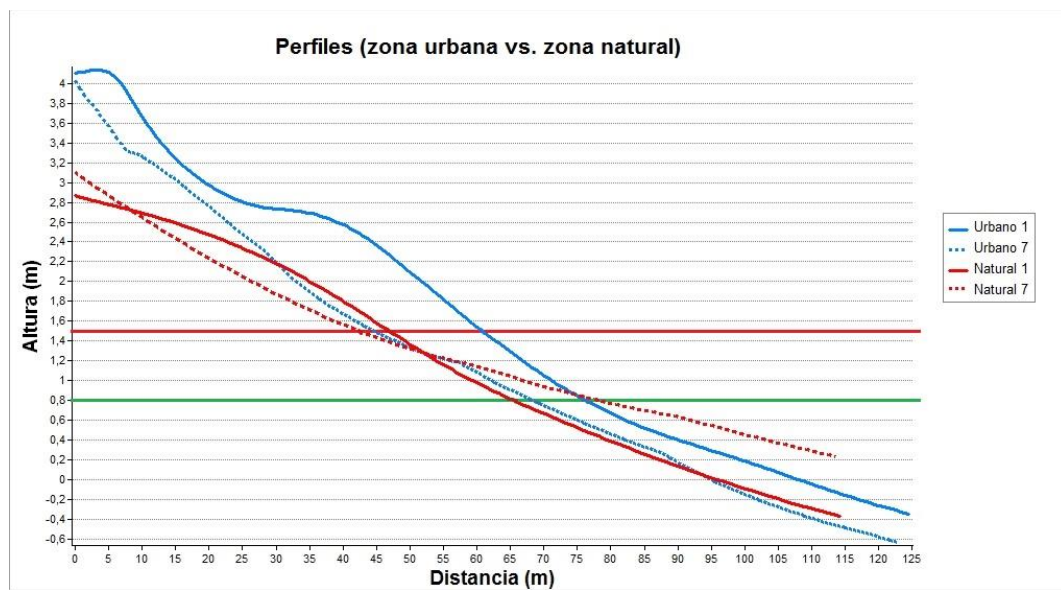
Nº Campaña	Fecha Campaña	Fecha Temporal	Duración (h)	Hm Mediana (m)	Hm Máxima (m)	Dirección Oleaje (°)	Dirección Viento (°)	Velocidad Viento (m/s)
1	1 Octubre 2015							
2	16 Octubre 2015							
3	29 Octubre 2015	2 Noviembre 2015	11	1,76	2,0	205,45	211,27	8,33
4	12 Noviembre 2015							
5	26 Noviembre 2015							
6	11 Diciembre 2015	4 Enero 2016	16	1,65	2,0	213,81	255,94	9,72
7	14 Enero 2016	10 Enero 2016	30	1,81	2,2	209,93	235,23	8,95

## 5.2. Morfología

La morfología de la playa ha evolucionado durante el invierno de estudio, de modo que se pueden apreciar los cambios en ambos sectores. La figura 8 muestra una comparación del primer perfil y del último para las zonas natural y urbana; los transeptos seleccionados para la extracción de los perfiles en ambas zonas son los mismos que se utilizaron para el cálculo de la pendiente en el intermareal y se muestran representados en la figura 7. Comparando su comportamiento en la figura 8, se observa un balance neto de basculamiento en la zona natural y rebajamiento de cota generalizado en la zona urbana. La berma, que se encuentra bien desarrollada en ambos sectores en la primera campaña realizada (1 Octubre 2015), prácticamente desaparece en la última (14 Enero 2016) (Figura 8). La zona intermareal, por su parte, refleja una acreción de sedimentos de carácter moderado, llegando hasta casi un metro de altura en la zona natural; se puede apreciar un comportamiento similar, aunque menos acentuado, en la zona urbana, en la

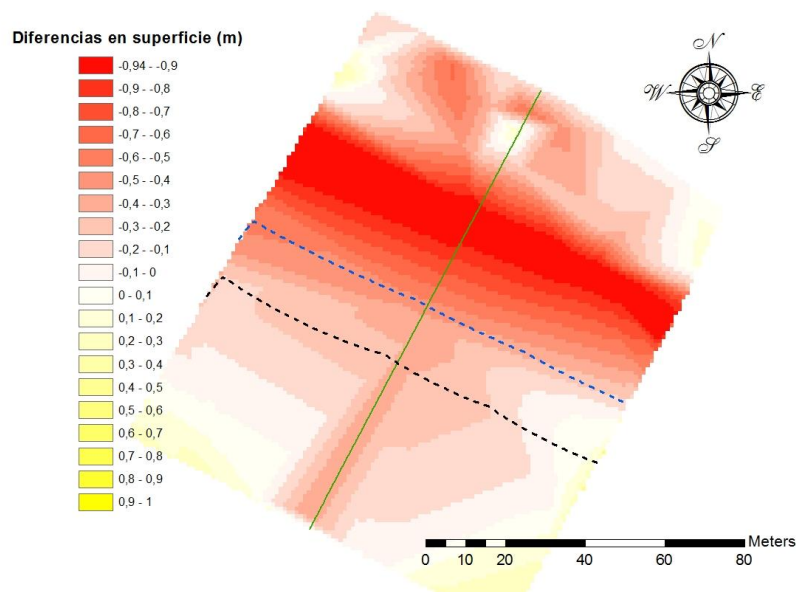
figura 9, que muestra las diferencias en metros en la superficie de la playa a partir de los modelos digitales de elevaciones (MDE's) de la primera y última campañas para la zona urbana. Los datos de pleamar viva y nivel medio del mar se corresponden con los datos de Puertos del Estado para el mareógrafo de Tarifa (Puertos del Estado, 2016).

En dicha figura se aprecia el mencionado comportamiento erosivo para la zona de *backshore* en el sector urbano, con diferencias máximas de 1,1 m de altura; en la zona intermareal se intercalan estados en equilibrio y erosión leve con zonas afectadas por acreción, con diferencias máximas de 0,5 m de altura entre la primera campaña y la última.

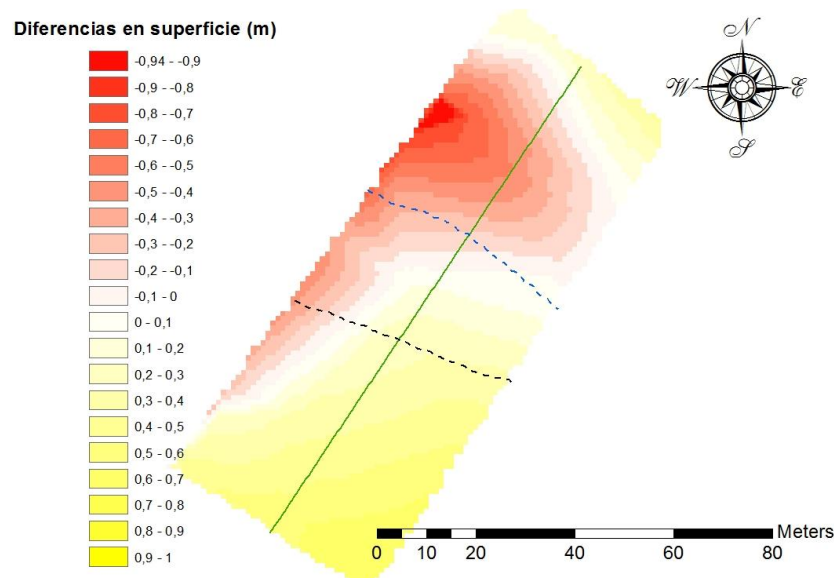


**Figura 8:** Comparación general de los perfiles inicial (1 Octubre 2015) y final (14 Enero 2016) para las zonas natural y urbana. La posición de los perfiles aquí representados se muestra en la figura 7. Las líneas verde y roja señalan el nivel medio del mar y el nivel medio de pleamar viva, respectivamente.

En la zona natural se observa un comportamiento similar, con erosión en la zona de *backshore* y acreción moderada en el intermareal (Figura 10), pero dado que la zona queda muy limitada transversalmente, resulta complicado establecer descripciones con fiabilidad.



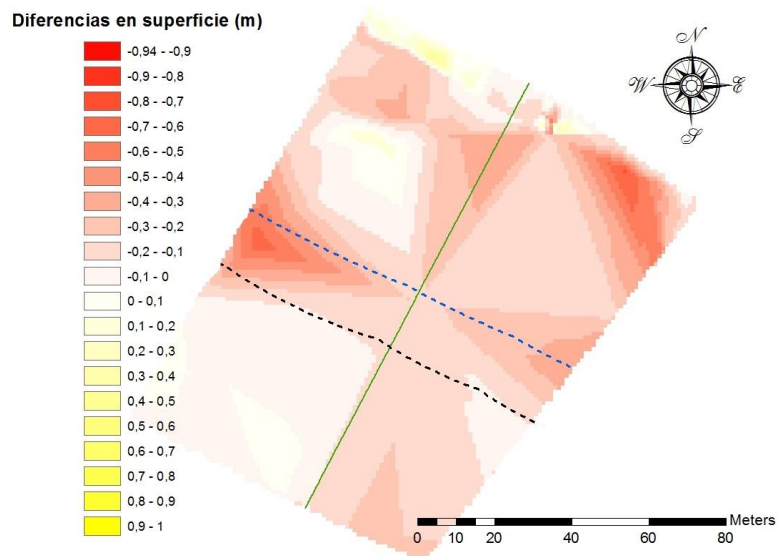
**Figura 9:** Diferencia de superficie en metros, entre la primera campaña (1/10/2015) y la última (14/01/2016) en la zona urbana. Rojo: zonas afectadas por la erosión; amarillo: zonas con acreción de sedimentos; blanco: zonas sin cambios netos. La línea verde representa el transepto escogido para la extracción de los perfiles y las líneas discontinuas señalan el nivel medio del mar (negro) y el valor medio del nivel de pleamar viva (azul).



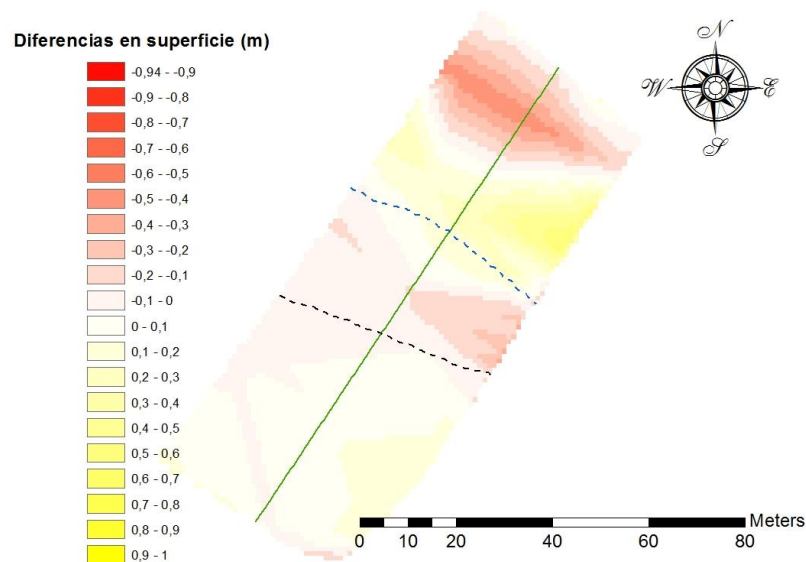
**Figura 10:** Diferencia de superficie en metros, entre la primera campaña (1/10/2015) y la última (14/01/2016) en la zona natural. Rojo: zonas afectadas por la erosión; amarillo: zonas con acreción de sedimentos; blanco: zonas sin cambios netos. La línea verde representa el transepto escogido para la extracción de los perfiles y las líneas discontinuas señalan el nivel medio del mar (negro) y el valor medio del nivel de pleamar viva (azul).

A continuación, se muestran los cambios sucedidos entre las campañas inmediatamente anteriores y posteriores a eventos de temporal (campañas 3, 4, 6 y 7, Tabla 3). Las diferencias que se pueden apreciar entre las campañas 3 y 4 (Figuras 11 y 12) son poco o nada esclarecedoras, ya que la mayor parte de la playa presenta cambios mínimos en ambas zonas, exceptuando algunas zonas aisladas de tamaño irrelevante. Sin embargo,

entre los dos últimos levantamientos sí se observan diferencias significativas, con erosión acentuada en la zona de berma, que muestra diferencias cercanas al metro de altura, y acreción de moderada a alta en la zona intermareal (Figuras 13 y 14)

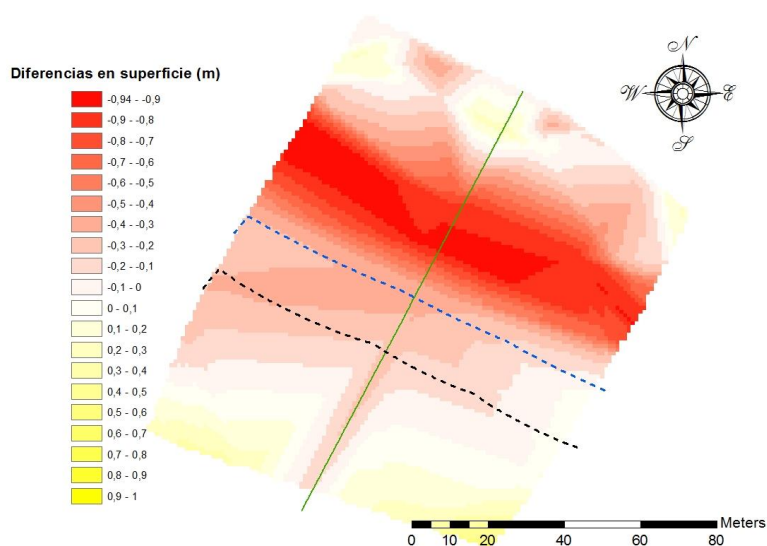


**Figura 11:** Diferencia de superficie en metros, entre la campaña 3 (29/10/2015) y la 4 (12/11/2015) en la zona urbana. Rojo: zonas afectadas por la erosión; amarillo: zonas con acreción de sedimentos; blanco: zonas sin cambios netos. La línea verde representa el transepto escogido para la extracción de los perfiles y las líneas discontinuas señalan el nivel medio del mar (negro) y el valor medio del nivel de pleamar viva (azul).

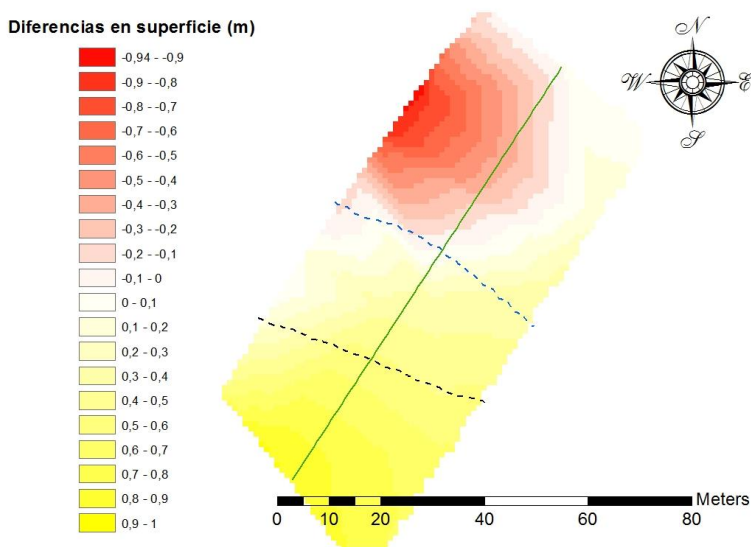


**Figura 12:** Diferencia de superficie en metros, entre la campaña 3 (29/10/2015) y la 4 (12/11/2015) en la zona natural. Rojo: zonas afectadas por la erosión; amarillo: zonas con acreción de sedimentos; blanco: zonas sin cambios netos. La línea verde representa el transepto escogido para la extracción de los perfiles y las líneas discontinuas señalan el nivel medio del mar (negro) y el valor medio del nivel de pleamar viva (azul).

Cabe señalar que la figura 11 muestra unos patrones geométricos que corresponden a efectos generados por la interpolación, lo que puede llevar a confusión a la hora de interpretar los resultados.



**Figura 13:** Diferencia de superficie en metros, entre la campaña 6 (11/12/2015) y la 7 (14/01/2015) en la zona urbanas. Rojo: zonas afectadas por la erosión; amarillo: zonas con acreción de sedimentos; blanco: zonas sin cambios netos. La línea verde representa el transepto escogido para la extracción de los perfiles y las líneas discontinuas señalan el nivel medio del mar (negro) y el valor medio del nivel de pleamar viva (azul).



**Figura 14:** Diferencia de superficie en metros, entre la campaña 6 (11/12/2015) y la 7 (14/01/2015) en la zona natural. Rojo: zonas afectadas por la erosión; amarillo: zonas con acreción de sedimentos; blanco: zonas sin cambios netos. La línea verde representa el transepto escogido para la extracción de los perfiles y las líneas discontinuas señalan el nivel medio del mar (negro) y el valor medio del nivel de pleamar viva (azul).

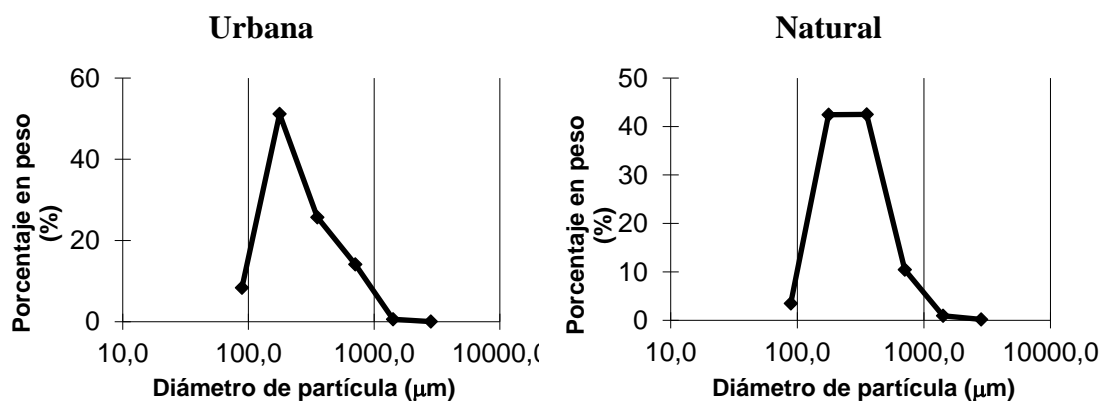
### 5.3. Granulometría

La Tabla 4 muestra los valores de los principales parámetros granulométricos de las muestras tomadas, que quedan resumidos gráficamente en la figura 15 para una mejor interpretación.

**Tabla 4:** Valores de los principales descriptores granulométricos para las muestras recogidas.

	Intermareal Bajo		Intermareal Alto		Playa Seca	
	Urbana	Natural	Urbana	Natural	Urbana	Natural
<b>D<sub>50</sub> (mm)</b>	0,22 Arena fina	0,23 Media - Fina	0,19 Arena fina	0,24 Media - Fina	0,24 Media - Fina	0,26 Media - Fina
<b>Clasificación (SD)</b>	1,82 Moderada	0,79 Bien clasificada	1,48 Moderada	0,61 Bien clasificada	1,55 Moderada	0,62 Bien clasificada
<b>Asimetría (SK)</b>	0,20 Muy asimétrico	-0,17 Asimetría negativa	0,17 Asimetría positiva	-0,06 Asimetría negativa moderada	0,04 Simétrico	0,06 Asimetría moderada
<b>Kurtosis (KG)</b>	1,00 Mesocúrtico	0,93 Mesocúrtico	1,17 Leptocúrtico	0,84 Platicúrtico	0,75 Platicúrtico	0,76 Platicúrtico

En general, la playa de El Carmen está compuesta por arena media-fina, de moderadamente a bien clasificada. De forma gráfica (Figura 15) pueden identificarse diferencias significativas en las características de los sectores analizados, teniendo la zona natural una mejor clasificación, un mayor porcentaje de arena de mayor tamaño, una asimetría menos marcada y una distribución menos apuntada. En contraposición, la zona urbana presenta sedimento peor clasificado, con asimetría marcada, leptocurtosis y un tamaño de arena fino.



**Figura 15:** Comparativa de la distribución del tamaño de las partículas en ambas zonas (µm). El eje de ordenadas representa el porcentaje en peso (%), mientras que en abscisas se representa el tamaño de las partículas (µm).



## 5.4. Características morfodinámicas

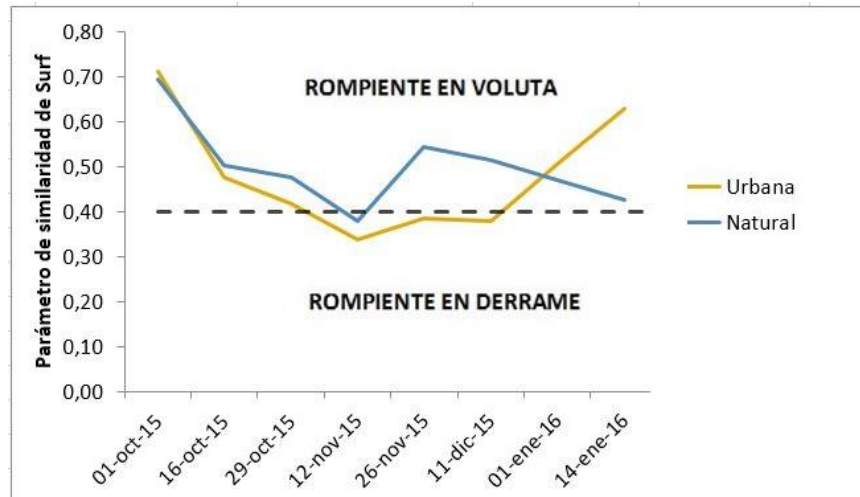
Como se mencionó anteriormente, el valor de la pendiente se ha calculado para el perfil seleccionado como representativo de cada zona de la playa. En la Tabla 5 se incluyen, además de la pendiente, los resultados obtenidos de los valores del Parámetro de Similitud de Surf y el Número de Dean, así como los valores medios del periodo (T) y de la longitud de onda en aguas profundas ( $L_0$ ) previos a cada campaña con los que se han calculado dichos parámetros, según la metodología explicada en el apartado 4. Se utilizaron los valores de  $D_{50}$  de 0,220 y 0,249 mm y de  $W_s$  de 0,052 y 0,059 para las zonas urbana y natural, respectivamente. Por último, los valores utilizados para  $H_b$  fueron 0,81, 0,80 y 0,98 m para los meses de noviembre, diciembre y enero respectivamente. Para el mes de octubre se utilizó el mismo valor que para el mes de noviembre, al no disponer de datos del mes anterior a la realización de las campañas.

**Tabla 5:** Valores de los índices morfodinámicos calculados y valores de pendiente de playa, periodo de oleaje y longitud de onda utilizados para su cálculo.

Nº Campaña	T (seg)	$L_0$ (m)	tan $\beta$ (%)		Similitud de Surf		Número de Dean	
			Urbana	Natural	Urbana	Natural	Urbana	Natural
1	8,50	15,89	3,15	3,08	0,71	0,70	1,84	1,61
2	6,38	22,07	2,49	2,63	0,48	0,50	2,46	2,14
3	9,15	23,65	2,26	2,58	0,42	0,48	1,71	1,50
4	7,46	31,99	2,13	2,38	0,34	0,38	2,10	1,84
5	7,02	18,39	1,83	2,59	0,38	0,54	2,23	1,95
6	4,61	31,56	2,38	3,22	0,38	0,51	3,38	2,95
7	7,60	22,87	3,04	2,06	0,63	0,43	2,50	2,18

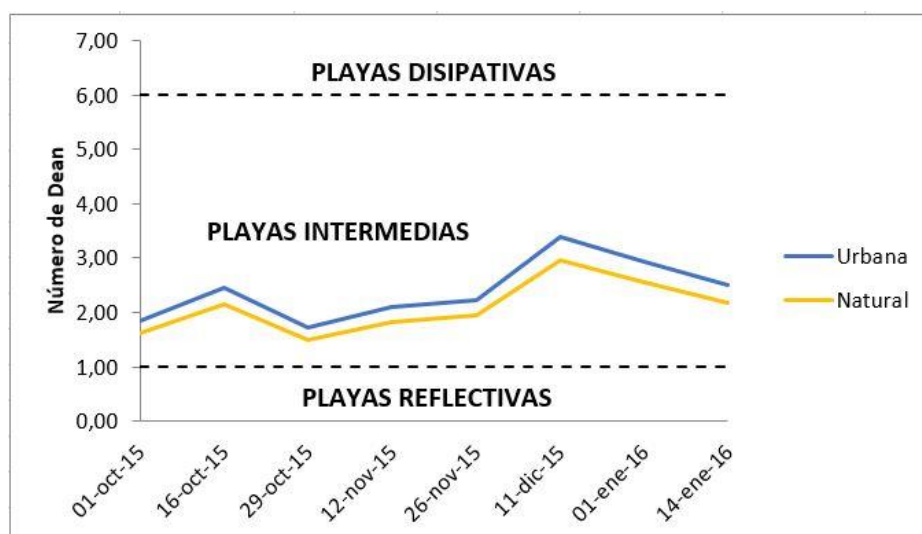
La figura 16 muestra la variación del Parámetro de Similitud de Surf en las distintas campañas realizadas, donde la línea de puntos representa el límite propuesto por Fredsoe y Deigaard (1992) entre los distintos tipos de rotura, encontrando roturas de tipo derrame por debajo del valor 0,4 y roturas de tipo voluta por encima de dicho valor. Durante las primeras campañas se observa una caída brusca del valor del parámetro en ambos sectores, llegando a ser de tipo derrame en la zona urbana hasta la última campaña, donde vuelve a incrementar el valor y hallando roturas de tipo voluta, en el caso del sector

natural, las roturas se mantienen de tipo voluta exceptuando la campaña del 12 de noviembre, que se identifica con una rotura de tipo derrame pero muy cercana al valor 0,4.



**Figura 16:** Variación del parámetro de Similitud de Surf en las distintas campañas. Límites según Fredsoe y Deigaard (1992)

En cuanto al Número de Dean, las variaciones entre las dos zonas son mínimas, identificando a ambas como playas con perfil intermedio en las todas las campañas. La Figura 17 muestra de forma gráfica la variación del Número de Dean entre las distintas campañas; las líneas de puntos indican los límites propuestos por Wright et al. (1985) para el estado morfodinámico.



**Figura 17:** Variación del Número de Dean a lo largo de las diferentes campañas. Límites según Wright et al. (1985).

## 6. DISCUSIÓN

Los cambios en el litoral son el resultado de multitud de procesos que ocurren simultáneamente y a diferentes escalas temporales, determinados por factores tales como el marco geológico, las características del oleaje, las características del sedimento y las intervenciones humanas, entre otros (Kumar *et al.*, 2010). La acción de los temporales es un factor natural de elevada importancia en los cambios litorales, ya que con frecuencia generan erosión costera y riesgos asociados a ésta. Con el objetivo de paliar en lo posible los impactos de la erosión costera, la administración española actúa periódicamente, regenerando artificialmente playas y dunas con el consiguiente desembolso económico. En la zona de estudio, la playa de El Carmen ha sido regenerada en numerosas ocasiones en las últimas dos décadas. Así, en 1993 se aportaron 23.150 m<sup>3</sup> de arena, con un desembolso por parte de la Administración de 41.000 €; en 2001 se vertieron 12.000 m<sup>3</sup> de sedimento, con un coste total de 58.000 € (Muñoz-Pérez *et al.*, 2001). Apenas tres años más tarde, en 2004, la playa se regeneró con 40.000 m<sup>3</sup> de arena, suponiendo un coste de 52.000 €; finalmente, en 2011 el volumen de sedimento aportado a la playa fue de 64.000 m<sup>3</sup> (Muñoz-Pérez *et al.*, 2014).

Por tanto, la regeneración de la playa no es un caso puntual, sino que se repite periódicamente. En este sentido, hay que señalar que de forma sistemática se producen acumulaciones de arena junto al muro del puerto pesquero, situado en el extremo noroeste de la playa, debido a los vientos predominantes de Levante. Esta situación produce un basculamiento general de la playa, pues en el extremo sureste, al final del paseo marítimo, se produce el efecto contrario, es decir una pérdida considerable de arena hasta el punto de que en pleamares ordinarias carece de playa seca, además del riesgo de deterioro de la cimentación del muro marítimo de defensa (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2015). De hecho, la evolución de la forma en planta de la playa en los últimos 60 años muestra una tendencia clara al basculamiento en este sentido, de forma que la parte natural de la misma es cada vez más estrecha, y el extremo occidental incrementa su anchura (Del Río *et al.*, 2012).

### 6.1. Cambios morfológicos a corto plazo

Sobre la metodología empleada, es importante señalar que el método utilizado para la realización de los perfiles topográficos con DGPS, con la posterior interpolación y construcción de los MDT's para comparar, es válido siempre y cuando en el campo se

asegure el ubicar los perfiles en todo momento sobre las mismas líneas. En el caso de la zona natural, esto no fue posible debido a la falta de puntos de referencia. Por tanto, para evitar tener que recortar los MDT's y perder información, es de vital importancia encontrar un método sencillo para extraer los perfiles correctamente, y se debe prestar especial atención a la zona de donde se extrae el perfil, pues en algunas ocasiones podría no ser representativo de la totalidad del sector estudiado.

El periodo estudiado del invierno 2015-2016 se ha caracterizado por unas condiciones meteorológicas benignas, con escasa presencia de temporales marítimos. Por este motivo, tal y como se expuso en el apartado 4.4, se han considerado como temporal todos los sucesos durante el periodo de estudio, aunque en alguno de los registros horarios no alcancen el umbral propuesto por Puertos del Estado.

En general, a lo largo del periodo analizado (Octubre 2015-Enero 2016) se detecta un rebajamiento de cota en la zona urbana y un balance neto de basculamiento en la zona natural; se observa también que la berma desaparece prácticamente y que existe una acreción moderada de sedimentos en la zona intermareal. Todos estos cambios responden a un comportamiento típico de playas estacionales (Benavente, 2000), pues a medida que avanza el otoño aumenta la intensidad del oleaje que va erosionando la zona activa del perfil de playa, principalmente la parte alta del intermareal, y el sedimento erosionado se va depositando mar adentro provocando una acreción de sedimentos en la parte baja del perfil.

Comparando los MDTs realizados con las fechas de ocurrencia de los temporales se observa que el primer temporal apenas tiene relevancia y no produce cambios significativos en la morfología de la playa. Sin embargo, entre las dos últimas campañas las diferencias entre los perfiles de playa son evidentes, ya que se sucedieron dos eventos de temporal antes de la última recogida de datos y con características más energéticas, tanto en lo que respecta a su altura de ola como en su duración.

Por otra parte, los cambios más significativos en la morfología de la playa se producen entre las dos últimas campañas, tras los temporales registrados los días 4 y 10 de enero, que fueron los de mayor duración y los asociados a una mayor velocidad del viento. El oleaje en dichos temporales no es significativamente superior, ya que las alturas medias

son muy similares en los tres temporales detectados (entre 1,7 y 1,8 m, Tabla 3), si bien el del día 10 de enero es el que presenta una mayor altura máxima.

## **6.2. Características granulométricas**

En cuanto a la caracterización sedimentológica, la técnica utilizada para el análisis de las muestras resulta sencilla y rápida, además de no requerir de ninguna tecnología adicional. La recolección de dichas muestras se realizó una sola vez durante el periodo de estudio, ya que trabajos previos han mostrado la escasa variabilidad temporal del tamaño de grano en la playa de El Carmen a una escala de pocos meses (Del Río, 2007).

La interrelación entre el tamaño del sedimento y la forma del perfil es bien conocida; así, playas de material más grueso presentan pendientes más pronunciadas y viceversa (Medina *et al.*, 1995). En el caso del área de estudio, la zona natural presenta un tamaño de grano ligeramente superior al de la zona urbana; esta diferencia puede estar relacionada por varios factores, desde la presencia del canal submarino creado por la desembocadura del río Barbate y el depósito de sedimentos arrastrados por dicho río, al transporte eólico desde las dunas hacia la playa. Aunque las diferencias descritas son moderadas, conllevan cambios en la pendiente, que es más pronunciada en la zona natural, y este hecho a su vez condiciona la playa en su morfología y su respuesta ante los temporales.

En cuanto a los parámetros de clasificación, asimetría y curtosis, la zona natural presenta una mejor clasificación, así como simetría y platicurtosis, que indica que el tamaño de partículas no tiene afinidad por ningún tamaño de grano en particular, típico de sedimentos de playa (Alonso, 1993). En cambio, la zona urbana está peor clasificada, presenta asimetría positiva y leptocurtosis, lo que se traduce en un exceso relativo de material fino y una mayor variabilidad de tamaños de grano. Cabe señalar que la peor clasificación se asocia a un régimen deposicional de menor energía (Reyes, 1997), lo que en el caso de la zona urbana se puede relacionar con la orientación de la línea de costa, que determina que se halle más protegida de la acción del oleaje que la zona natural.

## **6.3. Características morfodinámicas**

El Parámetro de Similitud de Surf define el tipo de rompiente y, por consiguiente, el estado morfodinámico de la playa. En las playas estacionales, como la mayoría de las playas de la provincia de Cádiz (Del Río, 2007), durante los meses de verano, debido a la

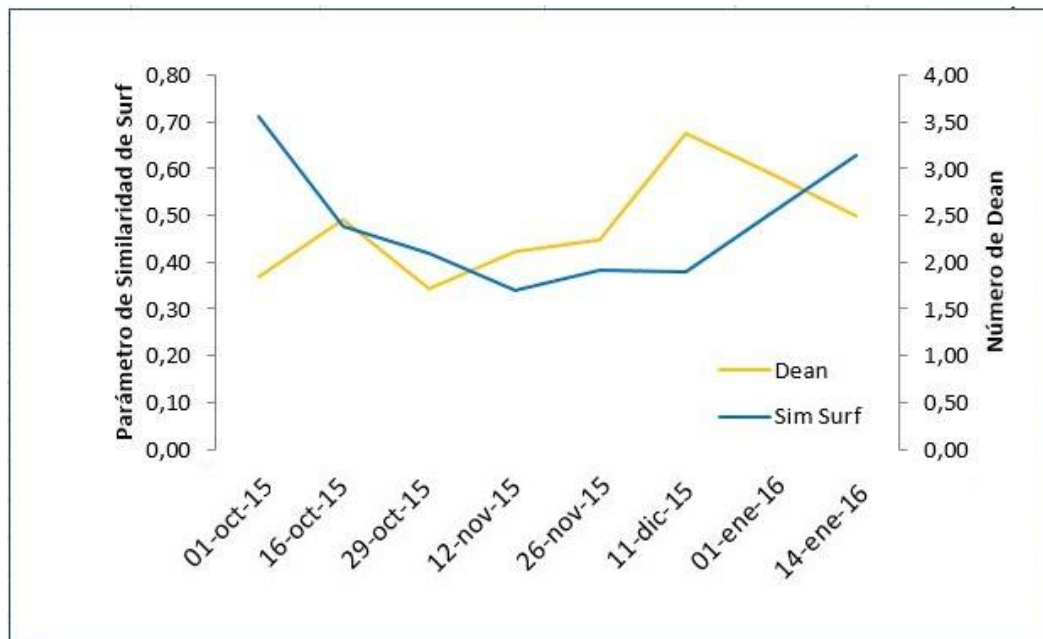
baja energía del oleaje, las playas presentan una elevada pendiente y características intermedias o incluso reflectivas. Con la llegada del invierno, caracterizada por un oleaje más severo y la presencia de temporales marítimos, se produce una transición en la pendiente de la playa, así como en el tipo de rompiente, pasando de las condiciones reflectivas típicas de verano, con rompientes de tipo voluta, a un intermareal de tipo disipativo con pendientes más suaves y rompientes en derrame.

En el presente estudio, según el Parámetro de Similitud de Surf, el tipo de rompiente cambia de voluta a derrame progresivamente, con un cambio más o menos brusco observable en la campaña 4, tras el primer temporal registrado, donde los valores caen por debajo del umbral para considerarlos como roturas de tipo derrame. A partir de este momento, cada sector tiende a comportarse de forma distinta; en la zona natural la rompiente vuelve a tipo voluta mientras que en la zona urbana se mantiene de tipo derrame hasta la última campaña, tras los dos últimos temporales registrados, donde el valor del parámetro se dispara en ambos sectores, pero de forma opuesta.

Por otro lado, el Número de Dean clasifica la playa como intermedia, con una tendencia progresiva a playas de tipo disipativo, típicas de invierno; en este sentido, la influencia de los temporales registrados es más notable en las últimas campañas, donde tras las condiciones energéticas de dichos temporales la pendiente se suaviza y se observa una tendencia del valor del parámetro hacia la estabilización. Ambos parámetros (Similitud de Surf y Número de Dean) informan sobre el estado morfodinámico de las playas, pero el parámetro de Similitud de Surf lo hace de forma indirecta, ya que el tipo de rompiente va a influir en los cambios en la pendiente de las playas; por lo tanto, se observa una correlación indirecta y desfasada en el tiempo entre ambos parámetros (Figura 18).

Asimismo, tiene sentido que las variaciones del Número de Dean entre los sectores urbano y natural sean mínimas, ya que para ambos se han utilizado los mismos valores de  $H_b$  y  $T$ , y las diferencias entre los valores de tamaño de grano medio ( $D_{50}$ ) no desvelan variaciones importantes. En cuanto al Parámetro de Similitud de Surf, el hecho de que las diferencias entre la zona urbana y la natural se vayan acentuando a medida que se avanza en el tiempo puede estar relacionado con las diferentes condiciones de contorno de ambos sectores: la zona urbana se puede ver condicionada por el puerto de Barbate, que ofrece una cierta protección de los oleajes de Poniente, mientras que la zona natural estaría condicionada por la presencia del canal submarino

creado por la desembocadura del río Barbate, el aporte de sedimentos de éste último o el transporte eólico desde las dunas. Todo esto se relaciona con la cantidad de arena disponible para el cambio morfológico: si hay arena suficiente en la zona durante la llegada del temporal, actuará como un obstáculo para las condiciones energéticas, permitiendo a la playa adaptarse a los cambios mediante la modificación de su estado morfodinámico (Benavente *et al.*, 2002).



**Figura 18:** Variación conjunta de los parámetros de Similitud de Surf y Número de Dean a lo largo del periodo de estudio.

Cabe señalar, por último, que debido a las limitaciones temporales para la realización de este trabajo no ha sido posible aplicar un modelo de propagación del oleaje a partir de batimetrías detalladas de la zona de estudio; no obstante, la formulación de Komar y Gaughan (1972) es un método sencillo y muy utilizado para la transformación de la altura del oleaje de aguas profundas a la zona de rompiente.

## 7. CONCLUSIONES

Debido a la ausencia de datos posteriores al último temporal registrado, resulta imposible conocer si el sistema vuelve al equilibrio o no y cuánto tiempo necesita para tal fin. Se requiere, por tanto, un periodo de estudio más amplio que comprenda eventos de temporal seguidos de eventos de calma para estimar la capacidad de recuperación natural de la

playa y poder confirmar mediante datos de campo la hipótesis de partida: que la costa de Barbate presenta altos niveles de vulnerabilidad física ante los temporales marítimos.

A partir del trabajo realizado, se puede concluir lo siguiente:

- En la playa de El Carmen (Barbate), a lo largo del periodo de seguimiento (Octubre 2015-Enero 2016) existen diferencias en la forma en que cambia el perfil de la playa entre el sector urbano y el natural, que se acentúan a medida que avanza el invierno.
- Los contrastes entre la evolución morfológica de ambos sectores pueden estar relacionados con múltiples factores, desde la presencia del puerto de Barbate, que ofrece una cierta protección de los oleajes de Poniente a la zona urbana, hasta las diferencias en la batimetría de cada sector o incluso la presencia del canal submarino creado por la desembocadura del río Barbate.
- Las diferencias observadas en el tipo de rompiente (Número de Dean) entre los sectores urbano y natural son mínimas y es probable que se deban exclusivamente a los distintos tamaños de grano que presentan. En cuanto a las diferencias en el Parámetro de Similitud de Surf entre ambos sectores, se atribuyen únicamente a las distintas pendientes de cada zona, que a su vez se encuentran relacionadas con el tamaño de grano.
- La metodología empleada en este estudio se considera adecuada. No obstante, se precisa de un estudio más amplio que abarque un periodo de tiempo mayor, para poder establecer diferencias entre el comportamiento de la playa en condiciones de buen tiempo y en condiciones asociadas a eventos de temporal.

## **8. BIBLIOGRAFÍA.**

Alonso, I. 1993. *Procesos sedimentarios en la playa de Las Canteras (Gran Canaria)*. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 333 pp.

Anfuso, G., Benavente, J., y Gracia, F. J. 2001. *Morphodynamic responses of nourished beaches in SW Spain*. Journal of Coastal Conservation, 7(1), 71-80.

Anfuso, G. y Del Río, L. 2003. Cuantificación de las variaciones volumétricas y evolución del litoral entre Chipiona y Rota (Cádiz) durante el período 1996-1998. *Cuaternario y Geomorfología*, 17(3-4), 17-27.



Benavente, J., Del Río, L., Anfuso, G., Gracia, F. J., y Reyes, J. L. 2002. *Utility of morphodynamic characterisation in the prediction of beach damage by storms*. Journal of Coastal Research, 36, 56-64.

Anfuso, G. y Benavente, J. 2006. *Las playas entre Chipiona y Rota (Cádiz, SO de España): Aproximación a su clasificación y comportamiento morfodinámico*. Ciencias Marinas, 32(4), 605-616.

Anfuso, G., Benavente, J., Del Río, L., & Gracia, F. J. 2008. *An approximation to short-term evolution and sediment transport pathways along the littoral of Cadiz Bay (SW Spain)*. Environmental geology, 56(1), 69-79.

Anfuso, G., Rangel-Buitrago, N., Cortés-Useche, C., Iglesias-Castillo, B. y Gracia, F.J. 2016. Characterization of storm events along the Gulf of Cadiz (eastern central Atlantic Ocean). *International Journal of Climatology*, 36(11), 3690-3707.

Balsillie, J. H. 1986. Beach and coast erosion due to extreme event impact. *Shore and Beach*, 54(4), 22-37.

Battjes, J. A. 1974. Surf similarity. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(14).

Benavente, J. 2000. *Morfodinámica litoral de la Bahía externa de Cádiz*. Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz, 534 pp.

Benavente, J., Gracia, F. J., y López-Aguayo, F. 2000. *Empirical model of morphodynamic beachface behaviour for low-energy mesotidal environments*. Marine Geology, 167(3), 375-390.

Benavente, J.; Del Río, L.; Anfuso, G.; Gracia, F.J. y Reyes, J.L. 2002. Utility of morphodynamic characterization in the prediction of beach damage by storms. *Journal of Coastal Research SI* 36, 56-64.

Benavente, J., Del Río, L., Gracia, F. J., y Martínez del Pozo, J. A. 2006. *Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain)*. Continental Shelf Research, 26(9), 1061-1076.

Benavente, J. Del Río, L. y Gracia, F. J. 2009. Riesgos litorales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 277-283.

- Benavente, J.; Del Río, L.; Anfuso, G. y Gracia, F.J. 2015. Storm impacts in contrasting coastal environments in the Bay of Cadiz (SW Spain). En D. Pereira de Paula y J. Alveirinho Dias (eds.): *Ressacas do mar – Temporais e gestao costeira*. Premium, Fortaleza, Brasil, p. 247-276.
- Borja, F., Zazo, C., Dabrio, C. J., Díaz del Olmo, F., Goy, J. L. y Lario, J. 1999. Holocene aeolian phases and human settlements along the Atlantic coastal of Southern Spain. *The Holocene*, 9(3), 333- 339.
- Boyer-Villemaire, U., Bernatchez, P., Benavente, J., y Cooper, J.A.G. 2014. Quantifying community's functional awareness of coastal changes and hazards from citizen perception analysis in Canada, UK and Spain. *Ocean & Coastal Management*, 93, 106-120.
- Capel Molina, J.J. 1981. *Los climas de España*. Oikos-Tau, Barcelona, 293 p.
- Dail, H.J., Merrifield, M.A. y Bevis, M. 2000. Steep beach morphology changes due to energetic wave forcing. *Marine Geology* 162, 443–458.
- Dean, R.G., 1973. Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proceedings of Conference on Engineering Dynamics in the Surf Zone* (Sydney, Australia), pp. 208-214.
- Del Río, L. 2007. *Riesgos de erosión costera en el litoral atlántico gaditano*. Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz, 490 pp.
- Del Río, L., Benavente, J., Gracia, F.J., Alonso, C., Rodríguez-Vidal, J. y Anfuso, G. 2008. Los espacios protegidos de la costa gaditana. En F.J. Gracia (ed.): *Geomorfología de los espacios naturales protegidos de la provincia de Cádiz*. SEG, Cádiz, p. 105-195.
- Del Río, L. y Gracia, F. J. 2009. Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. *Geomorphology*, 112(1), 82-95.
- Del Río, L., Plomaritis, T.A., Benavente, J., Valladares, M. y Ribera, P. 2012. Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cadiz coast. *Geomorphology* 143-144, 13-23.
- Del Río, L., Gracia, F.J. y Benavente, J. 2013. Shoreline change patterns in sandy coasts: a case study in SW Spain. *Geomorphology* 196, 252-266.

Dolan, R. y Godfrey, P. 1973. Effects of Hurricane Ginger on the barrier islands of North Carolina. *Geological Society of America Bulletin*, 84(4), 1329-1334.

ESRI, 2016. Differential GPS. Recuperado de: <http://www.esri.com/news/arcuser/0103/differential2of2.html>

Fredsøe, J. y Deigaard, R. 1992. *Mechanics of coastal sediment transport* (Vol. 3). World scientific.

Folk, R.L. y Ward, W.C. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27:3-26.

Gracia, F. J., Benavente, J., y Anfuso, G. 2000. Clasificación de costas y ambientes litorales. *Geomorfología litoral. Procesos activos*, 13-30.

Gourlay, M. R. y Meulen, T. 1968. Beach and dune erosion tests (I). Delft Hydraulics Laboratory, Report no. M935/M936.

Hegge, B., Eliot, I. y Hsu, J., 1996. *Sheltered Sandy beaches of southwestern Australia*. *Journal of Coastal Research*, 12, 748-760.

Iribarren, R. y Nogales, M. 1949. Protection des ports. *XVII Int. Nav. Congress*, Section II. Comm.4. Lisboa, 31-80.

Komar, P.D. y Gaughan, M.K. 1972. Airy wave theory and breaker height prediction: *Proceedings 13th Coastal Engineering Conference*, American Society Civil Engineers, pp. 405-418.

Komar, P.D. 1998. *Beaches and Sedimentation*, 2ª ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 544 pp.

Kumar, T.S., Mahendra, R.S., Nayak, S., Radhakrishnan, K. y Sahu, K.C. 2010. Coastal vulnerability assessment for Orissa State, East Coast of India. *Journal of Coastal Research*, 26 (3), 523–534.

Lario, J. 1996. *Ultimo y Presente Interglacial en el area de conexion Atlantico-Mediterraneo (Sur de España). Variaciones del nivel del mar, paleoclima y paleoambientes*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 269 pp.

Luque, L.D., Zazo, C. y Recio, J.M. 1999. Evolución sedimentaria de la laguna de la Janda (Cádiz) durante el Holoceno. *Cuaternario y Geomorfología*, 13(3-4), 43-50.

Gutiérrez Mas, J. M., Martín, A., Domínguez, S., y Moral, J.P. 1991. *Introducción a la Geología de la provincia de Cádiz*. Universidad de Cádiz, Servicio de publicaciones, 64 pp.

Masselink, G. y Short, A. D. 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9(3).

Medina, R., Losada, I.J., Losada, M.Á. y Vidal, C. 1995. Variabilidad de los perfiles de playa: forma y distribución granulométrica. *Ingeniería del Agua*, 1995, vol. 2, núm. 1 extraordinario.

Ménanteau, L., Vanney, J. R., y Zazo, C. 1983. Belo et son environnement (Detroit de Gibraltar): Etude physique d'un site antique.

Muñoz-Perez, J. J., de San Roman-Blanco, B. L., Gutierrez-Mas, J. M., Moreno, L., y Cuenca, G. J. 2001. Cost of beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain). *Coastal Engineering*, 42(2), 143-153.

Muñoz-Perez, J.J., Román-Sierra, J., Navarro-Pons, M., da Graça Neves, M. y del Campo, J.M. 2014. Comments on "Confirmation of beach accretion by grain size trend analysis: Camposoto beach, Cádiz, SW Spain" by E. Poizot et al. (2013), *Geo-Marine Letters* 33(4). *Geo-Marine Letters* 34(1), 75-78.

Plomaritis, T.A., Benavente, J., Laiz, I. y Del Río, L. 2015. Variability in storm climate along the Gulf of Cadiz: the role of large scale atmospheric forcing and implications to coastal hazards. *Climate Dynamics*, 45, 2499-2514.

Rangel-Buitrago, N. y Anfuso, G. 2013. Winter wave climate, storms and regional cycles: the SW Spanish Atlantic coast. *International Journal of Climatology*, 33(9), 2142-2156.

Reyes, J.L. (1997). *Aproximación metodológica al conocimiento del comportamiento morfosedimentario de playas mesomareales expuestas. Aplicación a la playa de La Barrosa (Chiclana de la Frontera)*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Cádiz, 188 pp.

- Ribera, P., Gallego, D., Peña-Ortiz, C., Del Río, L., Plomaritis, T.A. y Benavente, J. 2011. Reconstruction of Atlantic historical winter coastal storms in the Spanish coasts of the Gulf of Cadiz, 1929–2005. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11, 1-8.
- Sanz, F.J. 2000. La protección ambiental del litoral español. Hacia una gestión sostenible e integrada de las zonas costeras. *Anuario da Facultade de Dereito da Universidade da Coruña*, 2000, 4: 459-485.
- Small, C. y Nicholls, R.J. 2003. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 584-599.
- Stone, G. W. y Finkl, C. W. (Eds.). 1995. Impacts of Hurricane Andrew on the coastal zones of Louisiana and Florida, August 22–26, 1992. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 21.
- Tanner, W.F., 1960. *Florida coastal classification*. Transactions-Gulf Coast Association of Geological Societies, 10, 259-266
- Wright, L.D. y Short, A.D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56(1-4), 93-118.
- Wright, L.D., Short, A.D., y Green, M.O. 1985. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: an empirical predictive model. *Marine Geology*, 62(3-4), 339-364.
- Zazo, C., Goy, J. L., Somoza, L., Dabrio, C. J., Belluomini, G., Improta, S., Lario, J., Bardaji, T. y Silva, P. G. 1994. Holocene sequence of Sea-level Fluctuations in Relation to Climatic Trends in the Atlantic-Mediterranean Linkage Coast. *Journal of Coastal Research*, 10, 4: 933-945.
- Zújar, J. O. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30, 103-118.

